



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A**  
**BIOMECHANIK**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

# **NÁVRH MĚŘENÍ TEPLoty NA ROTUJÍCÍCH ČÁSTECH ELEKTRICKÉHO STROJE**

DESING OF MEASURING OF ELECTRIC MACHINE ROTOR TEMPERATURE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**JAN CHALUPA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**doc. Ing. RADEK VLACH, Ph.D**

BRNO 2012



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jan Chalupa

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Návrh měření teploty na rotujících částech elektrického stroje**

v anglickém jazyce:

### **Desing of measuring of electric machine rotor temperatue**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

rozbor problematiky měření teploty na rotujících částech elektrického stroje

návrh zpracování signálu ze snímače teploty

realizace přenosu naměřených dat do PC

Cíle bakalářské práce:

literární rešerše

návrh zpracování signálu ze snímačů teploty

návrh a realizace bezdrátového přenosu dat do PC

návrh a realizace programu pro zpracování naměřených dat

testování měřicího zařízení

Seznam odborné literatury:

- [1] Vlach, R.: Tepelné procesy v mechatronických soustavách. Skripta. VUT Brno, 2009.
- [2] Yunus, A.; Turner, H.; Cimbala, J.M.: Fundamental of Thermal-fluid Sciences. 3rd edition. McGraw Hill: Anstralia & New Zeland, 2008.
- [3] Ondruška, E.; Maloušek, A.: Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých. SNTL Praha, 1985.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 8.12.2011

L.S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, dr. h. c., CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá problematikou měření teploty na rotujících částích elektrických strojů. Součástí je i návrh a realizace hardwarového řešení, které umožňuje vícekanálové měření teploty pomocí čidel PT100 a bezdrátový přenos aktuální teploty do počítače. Softwarová aplikace má grafické uživatelské rozhraní a je spustitelná na operačních systémech Windows. Hardwarové nároky jsou minimální. Systém je primárně určen k provádění tepelných zkoušek strojů, nebo i k dlouhodobému monitoringu strojů ve stálém provozu.

Vysílací modul byl navrhován tak, aby jeho velikost a energetická spotřeba byla minimální. Důraz byl kladený na vysokou mechanickou odolnost a také na odolnost vůči teplotám uvnitř stroje. A právě vysoké požadavky na nízkoenergetický provoz, kompaktní rozměry a vyšší provozní teploty vyžadují komplexnější přístup k celému řešení systému.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

měření pomocí PT100, elektrické stroje, rotující součásti, bezdrátový přenos, záznam hodnot

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis is focused on temperature measurement issues of rotating parts of electrical devices. Thesis includes proposition and implementation of hardware solution, which enables multi-channel temperature measurements using PT100 sensors. Measured temperature is transmitted into the user's PC. Thesis also includes user software solution for Windows platforms. Hardware requirements are low. System is primarily determined for temperature test of electrical devices. It can be also used for long-term monitoring of devices in operating state.

Transmitter was designed with following considerations. Minimal size, low consumption, mechanical and thermal endurance. These demands require comprehensive approach to the whole system solution.

## **KEY WORDS**

measurement using PT100, electrical machines, rotary parts, wireless transmission, data-logger

### **Bibliografická citace mé práce:**

CHALUPA, J. *Návrh měření teploty na rotujících částech elektrického stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 63 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně na základě svých znalostí, dovedností, rad a pokynů vedoucího bakalářské práce. A uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Brně dne: .....

.....

Jan Chalupa





## OBSAH

ÚVOD.....	1
1 Popis celého systému .....	2
1.1 Zapojení mostu a popis funkce regulátoru .....	3
1.2 AD převod a zesilovač .....	4
1.3 Zapojení a plošný spoj přijímače .....	6
1.4 Zapojení a plošný spoj vysílače .....	8
1.5 RF moduly.....	10
1.5.1 Komunikace s přijímacím RF modulem:.....	12
1.5.2 Komunikace s vysílacím RF modulem:.....	13
1.6 Procesor Atmega8A (modul přijímače) .....	14
1.7 Procesor ATtiny26L (modul vysílače).....	15
1.8 Teplotní čidlo TMP123 .....	16
2 Power management vysílače.....	17
2.1 Napájení vysílače .....	17
2.2 Parametry spotřeby dle katalogových listů .....	18
2.3 Experimentální měření proudu procházejícího součástkami .....	19
2.4 Baterie Li-pol .....	19
3 Popis software prostředí.....	20
3.1 Kód v jazyku C pro přijímač .....	20
3.2 Kód v jazyku C pro vysílač .....	23
3.3 Aplikace pro PC .....	25
4 Kalibrace a kompenzace .....	27
4.1 Kalibrační procesy .....	27
4.1.1 První kalibrační proces (výrobní) .....	27
4.1.2 Druhý kalibrační proces (uživatelský).....	28
4.2 Kompenzace vlivu okolní teploty .....	29
5 Testování.....	30
5.1 Teplotní testy.....	30
5.1.1 Zapojení při testech.....	30
5.2 Mechanické testy.....	30
5.3 Test radiového přenosu .....	30
6 Závěr: .....	31
7 Zdroje.....	32
8 Seznam použitých zkratk + vysvětlivky .....	34
9 Seznam použitých obrázků, tabulek a grafů .....	35
10 Seznam příloh .....	36

## ÚVOD

Cílem této práce je vyřešit problematiku měření teploty na rotujících součástech elektrických, popřípadě i jiných strojů, tak aby aktuální teplota byla zobrazena na zařízení umístěném mimo měřený stroj. Jednotka je navržena k provádění tepelných zkoušek strojů i k dlouhodobému monitoringu strojů ve stálém provozu.

Způsobů měření může být mnoho, ale tato práce se zabývá pouze elektronickým měřením pomocí odporových čidel PT100. Měření lze provádět pomocí dataloggeru, kde jsou hodnoty postupně ukládány do paměti modulu. Hlavní nevýhodou této metody je offline vyhodnocení dat. Tedy data o zkoušce můžeme zpracovávat až po ukončení zkoušky a vyjmutí dataloggeru. Bezdrátový modul však informaci poskytuje okamžitě a je možné provést akční zásah na základě výsledků měření. To se může hodit například v situaci, kdy se během zkoušky překročí kritické teploty. Tím můžeme například zabránit poruše izolace vinutí. Další výhodou je možnost určení trendu vývoje teploty během zkoušky.

Jelikož se jedná o bateriově napájený systém, s variabilní dobou provozu, byly kladeny vyšší nároky na energetickou hospodárnost provozu.

Z toho plyne, že se návrh snaží minimalizovat ztrátové výkony, které by přispívaly k nechtěnému oteplování jednotky a zbytečným ztrátám energie.

Elektronické měření na rotujících soustavách se vyznačuje celou řadou specifík, které je nutné brát v úvahu, aby měřicí modul splňoval požadovanou funkci. Při návrhu vysílacího modulu je třeba dbát na mechanickou a tepelnou odolnost. Z mechanického hlediska je třeba uvažovat velkou odstředivou sílu, vibrace nebo prudké změny úhlového zrychlení.

Tepelný vliv okolí je o dost podstatnější, než mechanický. Od určitých teplotních mezí se začínají reálné parametry součástek docela podstatně lišit od katalogových údajů, dochází k nepřesnostem nebo dokonce k úplnému selhání funkce součástky. Správné zvládnutí kompenzace chyb, vlivem teploty je stěžejní pro zvýšení přesnosti měření a také pro zajištění správné funkce bezdrátové komunikace.

## 1 Popis celého systému

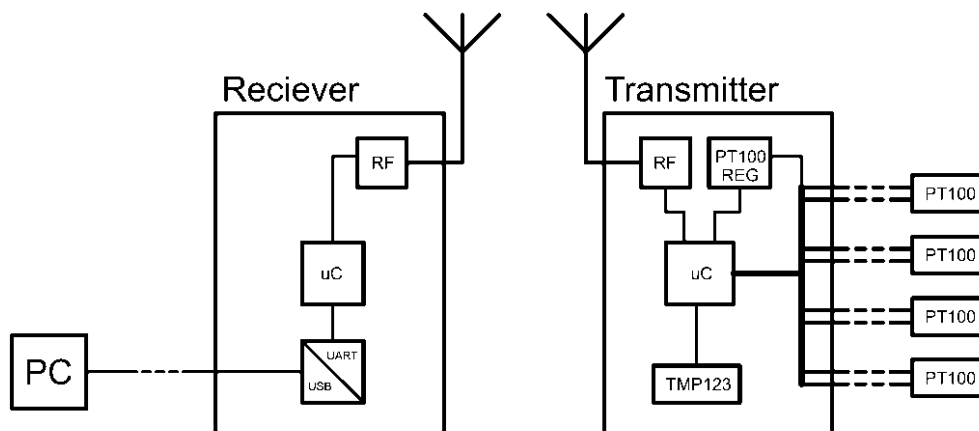
Systém se skládá ze dvou oddělených částí. Vysílače (transmitter) a přijímače (reciever). Tyto dva moduly mezi sebou komunikují jednosměrně pomocí bezdrátových modulů firmy HopeRF. Rádiové moduly pracují ve volném kmitočtovém pásmu kolem 868Mhz.

Modulární složení přijímače:

- rádiový přijímač RFM01 (Obr.1-RF) výrobce HopeRF
- mikrokontroler Atmega8A (Obr.1- $\mu$ C) výrobce Atmel
- převodníku sériové linky na USB sběrnici FT232BL (Obr.1- UART/USB) výrobce FTDI

Modulární složení vysílače:

- rádiový vysílač RFM02 (Obr.1-RF) výrobce HopeRF
- mikrokontroler Attiny26L (Obr.1- $\mu$ C) výrobce Atmel
- digitální teplotní čidlo TMP123 (Obr.1-TMP123) výrobce Texas Instr.
- stabilizátor napětí LP2980 (Obr.1-PT100 REG) výrobce National Instr.
- Odporová teplotní čidla PT100 (Obr.1-PT100)



Obr. 1: modulární složení systému

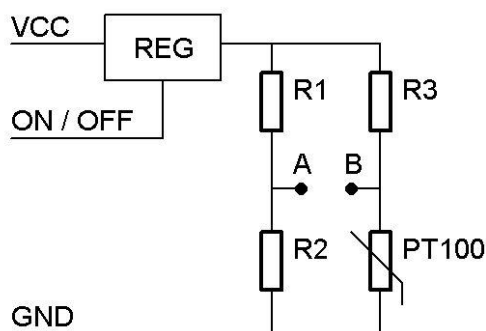
Vysílač slouží ke zpracování teploty ze 4 externích teplotních čidel PT100. Měření se provádí pomocí integrovaného diferenciálního zesilovače, který měří rozvážení mostu. Vysílač obsahuje také digitální čidlo teploty TMP123, které sleduje teplotu celé jednotky, tím pádem sleduje teplotu odporů měřicího mostu, teplotu integrovaného zesilovače a AD převodníku. Právě teploty vyšší než pokojové do značné míry ovlivňují výsledek teplotního měření. Dále je vysokou teplotou ovlivněn i rádiový přenos a hodinový takt procesoru. Tyto výkyvy se kompenzují na základě zkoušek modulu ve speciálních případech viz. kapitola 4.2.

## 1.1 Zapojení mostu a popis funkce regulátoru

Z důvodu využití celého rozsahu AD převodníku bylo zvoleno zapojení do Wheatstonového můstku. Zjednodušené zapojení měřicí mostu pro jedno odporové teplotní čidlo PT100 je na Obr.2. Můstek je napájen z precizního a tepelně stabilního regulátoru, který má na výstupu 3V (nebo 0V) a lze jej ovládat mikrokontrolerem. Ovládáním napětí zamezíme zbytečnému ohřívání čidel a odporů v můstku vlivem průtoku měřicího proudu. Další výhodou je úspora energie během doby, kdy se neprovádí měření.

Měření se provádí s malou prodlevou po zapnutí regulátoru, kvůli ustálení napětí na kondenzátorech, které jsou na vstupech jednotlivých čidel. Tyto kondenzátory slouží jako blokování vysokofrekvenčních složek, které se mohou vyskytnout na kabelovém vedení čidla.

Větev s odpory R1 a R2 slouží jako společný pevný napěťový dělič, jehož výstup svorka A (Obr.2) je přiveden na negativní vstup diferenciálního zesilovače. Hodnoty těchto odporů byly zvoleny v závislosti na zesílení, referenčním napětí AD převodníku, teplotním rozsahu a na napájení můstku. Odpor R2 má  $91\Omega$ , tato hodnota byla zvolena tak, aby se dala jednotka kalibrovat na teplotě  $0^{\circ}\text{C}$ . Odpor R1 a R3 má hodnotu  $2\text{k}\Omega$  (odpory by si měli být co nejvíce podobné, pro zajištění přesnosti). Protože čidlo PT100 bude mít v provozu větší odpor než  $91\Omega$ , připojíme svorku B (Obr.2) na pozitivní vstup diferenciálního zesilovače. Z Ohmova zákona vyplývá, že děliči R1/R2 a R3/PT100 nepoteče proud větší než  $1,434\text{mA}$ .



Obr. 2: měřicí můstek

## 1.2 AD převod a zesilovač

Procesor vysílacího modulu ATiny26L obsahuje 10-ti bitový AD převodník se separovaným napájením. Jedenáct analogových vstupů lze pomocí vnitřního signálového přepínače nastavit jako 7 vstupový diferenciální zesilovač s programovatelným zesílením 0dB (1x) nebo 26dB (20x). Právě tyto vlastnosti převodníku byly rozhodující při hledání vhodného procesoru. Největší výhodou je programovatelné zesílení a možnost snadného přepínání diferenciálních vstupů. Tímto se eliminovala potřeba externích zesilovačů, odporů a dalších podpůrných součástek, což je opravdu velká úspora místa a energie.

Signálový přepínač a programovatelný zesilovač je řízen registrem ADMUX, který volí mezi 4-mi skupinami diferenciálních nebo 11-ti single-ended vstupy. Každá skupina má 2 pozitivní a jeden negativní společný diferenciální vstup. ADMUX dále volí typ reference. V tomto případě jako referenční napětí slouží 3V z přesného teplotně stabilního regulátoru napájecího čidla PT100.

Zdroj hodinového signálu pro převodník je nastaven předděličkou z hodinového signálu jádra mikrokontroleru. Dle datasheetu je vhodné nastavit hodinový signál na co nejmenší kmitočet, aby se zlepšila přesnost převodu. Kmitočet však nesmí být moc nízký, jelikož obvody, pro aproximaci převodníku, pracují pouze při frekvenci vyšší než 50kHz. Proto byl zvolen hodinový takt na 62,500 kHz. Referenční napětí 3V je přivedeno na pin AREF. Zesilovač mikrokontroleru je teplotně kompenzovaný a má zabudován automatický obvod pro eliminaci chyby vlivem offsetového napětí.

Navrhování mostu se řídilo několika aspekty:

- |                                   |                            |
|-----------------------------------|----------------------------|
| • zaručený teplotní rozsah měření | -10°C až 270°C             |
| • vhodný proud protékající čidlem | max. 2mA                   |
| • způsobem zamýšlené kalibrace    | ledová tříšť-vroucí voda   |
| • zesílením a volbou reference    | zesílení 20x, reference 3V |

Teplotní rozsah určuje hranice, ve kterých se bude pohybovat hodnota odporu čidla PT100. Odpor pro teplotu -10°C je cca 96Ω, pro teplotu 270°C je cca 202Ω. Při napájení mostu 3V naměříme v uzlu B (Obr.2) napětí od 137-275mV. Toto napětí je přivedeno na kladný vstup diferenciálního zesilovače. Záporný vstup je spojen s uzlem A (Obr.2) na kterém je stálé napětí 130mV. Rozdíl napětí je zesílen a převeden na 10-ti bitovou hodnotu (0 = 0V, 1024 = 3V). K výpočtu slouží rovnice (1).

$$AD \text{ převod} = \frac{U_{\text{diferenciální}} \cdot \text{zesílení} \cdot 1024}{U_{\text{referenční}}} \quad (1)$$

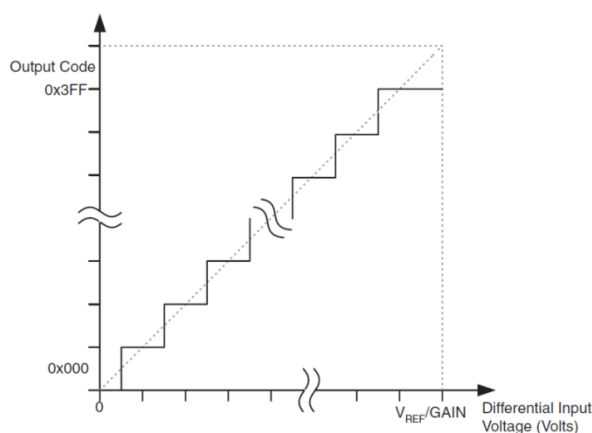
$U_{\text{diferenciální}}$  je z rozsahu 7~145mV, zesílení 20 a  $U_{\text{referenční}}$  má hodnotu 3V

V tabulce 1 jsou pro přehled zobrazeny dva stavy pro krajní teploty rozsahu.

odpor [Ω]	uzel B [mV]	uzel A [mV]	U <sub>diff</sub> [mV]	zesílení [-]	výsledek [V]	rozlišení [mV]	převod [-]
96	137	130	7	20	0,14	2,93	47
202	275	130	145	20	2,9	2,93	990

**Tabulka 1: přehled stavů krajních mezí rozsahu**

Graf 1 závislosti výstupní hodnoty AD převodníku na vstupním diferenciálním napětí zobrazuje spojitou analogovou veličinu napětí (čárkovaná čára) a výsledek AD převodu plná lomená křivka.



**Graf 1: graf závislosti výstupní hodnoty AD převodníku na vstupním napětí [16]**

Díky 10-ti bitovému rozlišení, 3V referenčnímu napětí a dvacetinásobnému zesílení je AD převodník schopný detekovat změnu diferenciálního napětí o 0,146mV. Měření každého kanálu se provádí 4 krát a poté se zaznamená průměrná naměřená hodnota, která je vysílána ke zpracování v PC. (Přepočet AD výsledku na skutečnou teplotu je uveden v kapitole 4.1.1.)

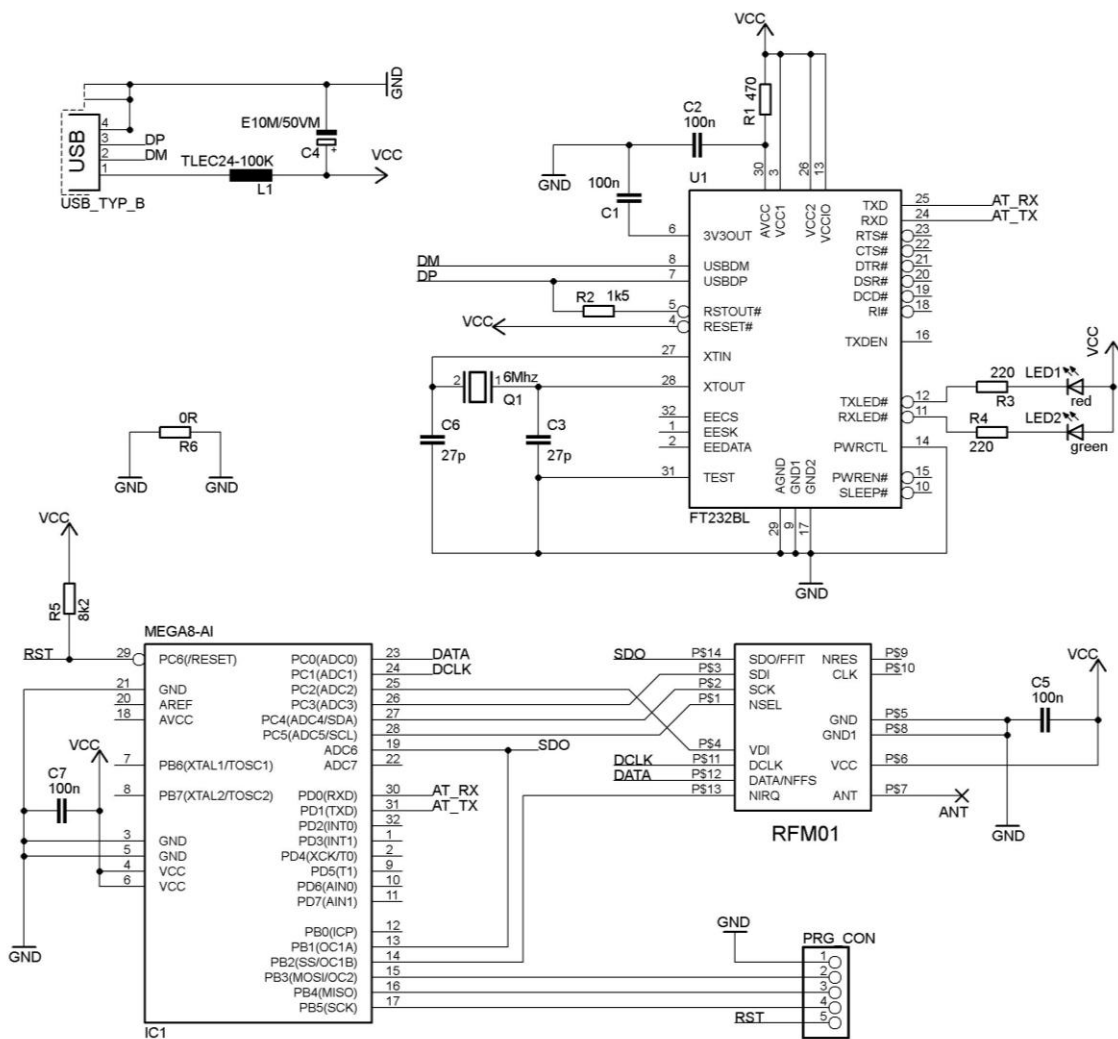
V případě že čidlo není připojeno, nebo je překročena maximální teplota, zesilovač přejde do saturace a výsledek AD převodu se nastaví na hodnotu 1024. V případě že odpor teplotního čidla klesne pod 91Ω, dojde opět k saturaci zesilovače a výsledek AD převodu bude roven nule.

AD převodník slouží také k monitoringu stavu Li-pol baterie, v tomto případě se měření provádí jedním single-ended vstupem. Referenční napětí zůstává stejné, jako pro měření diferenciálním zesilovačem. Výsledek AD převodu dle rovnice (2).

$$AD \text{ převod} = \frac{U_{\text{baterie}} \cdot \frac{1}{2} \cdot 1024}{U_{\text{referenční}}} \quad (2)$$

### 1.3 Zapojení a plošný spoj přijímače

Přijímací část je ve své podstatě jednoduchým obvodem. Jehož funkce spočívá ve zprostředkování komunikace mezi PC a vysílacím modulem. Mikrokontroler nastavuje RF modul, zpracovává a ověřuje platnost příchozích zpráv, které posléze odesílá do PC. Celé zařízení je napájeno ze sběrnice USB.



Obr. 3: schéma zapojení přijímacího modulu

Mikrokontroler Atmega8 je spojen s bezdrátovým modulem RFM01 prostřednictvím SPI sběrnice, která je softwarově emulovaná. Dále je spojen s obvodem FT232BL sběrnici UART. Pro komunikaci po UARTu používá mikrokontroler vlastní periférii, která funguje v asynchronním režimu. Obvod FT232BL slouží jako převodník USB/UART. Vzhledem k tomu, že aplikace přijímače nevyžaduje přesné časování, tak mikrokontroler využívá zabudovaný oscilátor, který má kmitočet 4MHz. Všechny obvody mají svůj vlastní blokovací kondenzátor umístěný co nejblíže napájecích vývodů, tak aby eliminoval vysokofrekvenční rušení.

Obvod FT232BL je zapojen přesně podle katalogových schémat. Pro svou funkci potřebuje vlastní krystalový oscilátor. FT232BL řídí dvě signalizační LED diody pro příjem a vysílání na UART sběrnici. Pro připojení k PC byl zvolen konektor USB typu B, aby bylo možné jednotku libovolně umístit v blízkosti zkoušeného stroje.

Přijímací RF modul RFM01 je velmi variabilní co se týče způsobu připojení a datových toků. Pro nastavování parametrů RF přenosu je využita sběrnice SPI a pro příjem zpráv byla zvolena sériová komunikace, pro kterou je použito dvou digitálních signálů DCLK a DATA. DCLK slouží jako hodinový signál platnosti logického stavu signálu DATA.

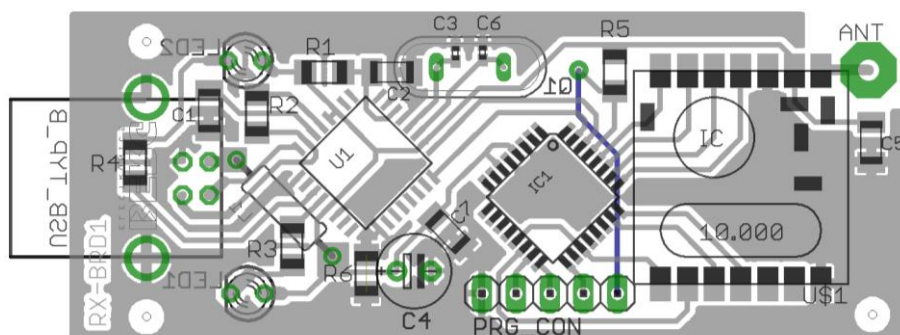
Jako anténa pro přijímač i vysílač poslouží čtvrtvlnný monopól (prutová anténa), vyrobená z kousku leštěného měděného drátu o průřezu  $2,5\text{mm}^2$ . Délku antény získáme výpočtem z rovnice (3).

$$L = \frac{1}{4} \cdot \lambda = \frac{1}{4} \cdot \frac{c}{f} = \frac{1}{4} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{868 \cdot 10^6} = 0,0864 \text{ [m]} \quad (3)$$

kde  $L$  je délka antény,  $c$  je rychlost světla a  $f$  je centrální frekvence použitého pásma.

Velkou výhodou RF modulu je integrovaný obvod pro automatické přizpůsobení k impedanci připojené antény, což usnadní a zrychlí návrh modulů. Další předností tohoto obvodu je kompenzace tzv. hand-effectu. Hand-effect je způsoben dotykem antény s rukou, nebo jiným vodivým předmětem, který svou impedancí vůči zemi zásadně změní impedanci antény.

Požadavky pro návrh desky plošných spojů (dále jen DPS) přijímače, nebyly tak náročné jak při tvorbě DPS vysílače. Přijímač je o něco jednodušší než vysílač. Proto stačila jednovrstvá DPS. Ohled byl brán na EMC, menší rozměry a snadnou sestavitelnost. Během vývoje byly vyrobeny dvě verze. První testovací verze, která byla vyrobena v domácích podmínkách fotocestou (pro ověření funkčnosti). Během testování se však objevilo několik nedostatků, které vedly k vytvoření nové finální verze DPS, která byla později zadána k výrobě ve firmě Pragoboard.

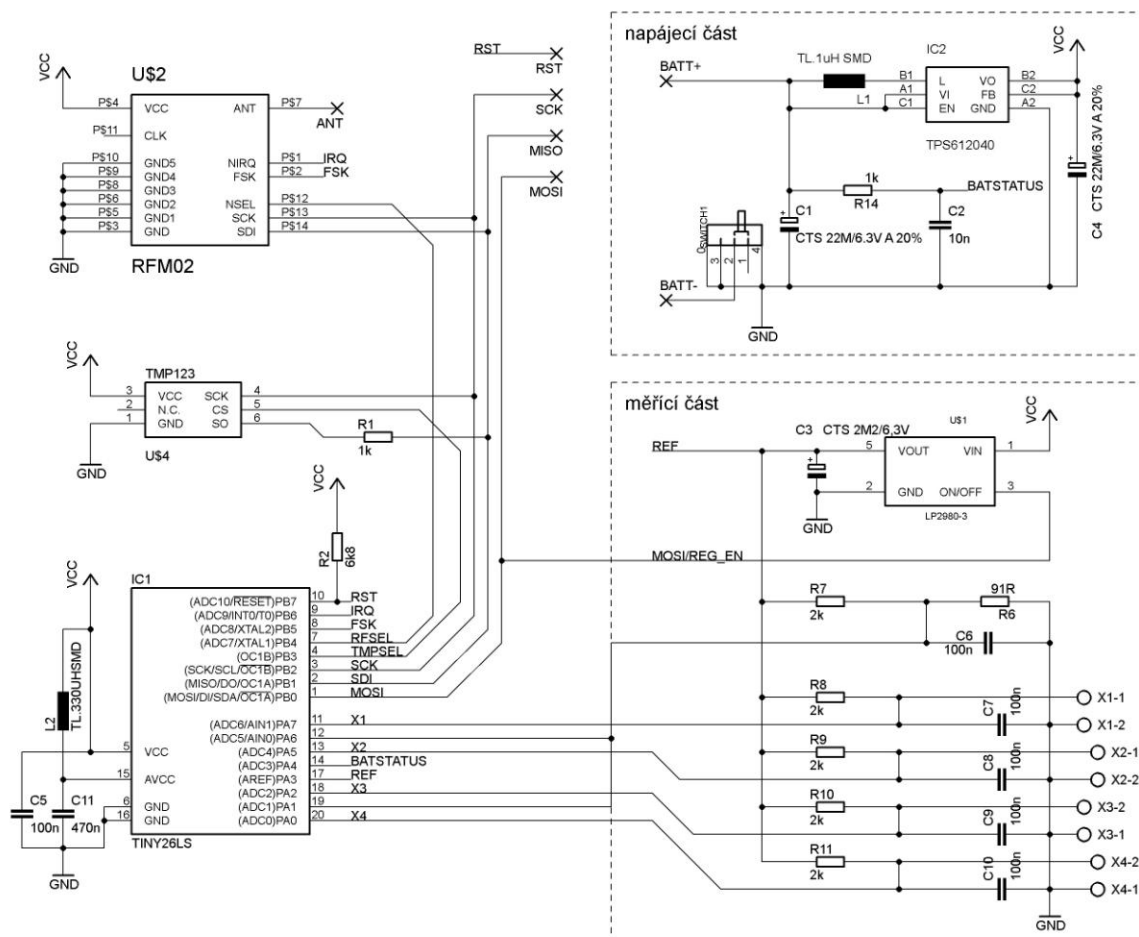


Obr. 4: plošný spoj přijímacího modulu



## 1.4 Zapojení a plošný spoj vysílače

Vysílací část slouží ke snímání teploty z čidel a k vyslání naměřených dat k jednotce přijímače. Mikrokontroler nastavuje RF modul, zpracovává analogové veličiny z odporových čidel, ovládá komunikaci s digitálním čidlem a odesílá data. Celé zařízení je napájeno z Li-pol článku.



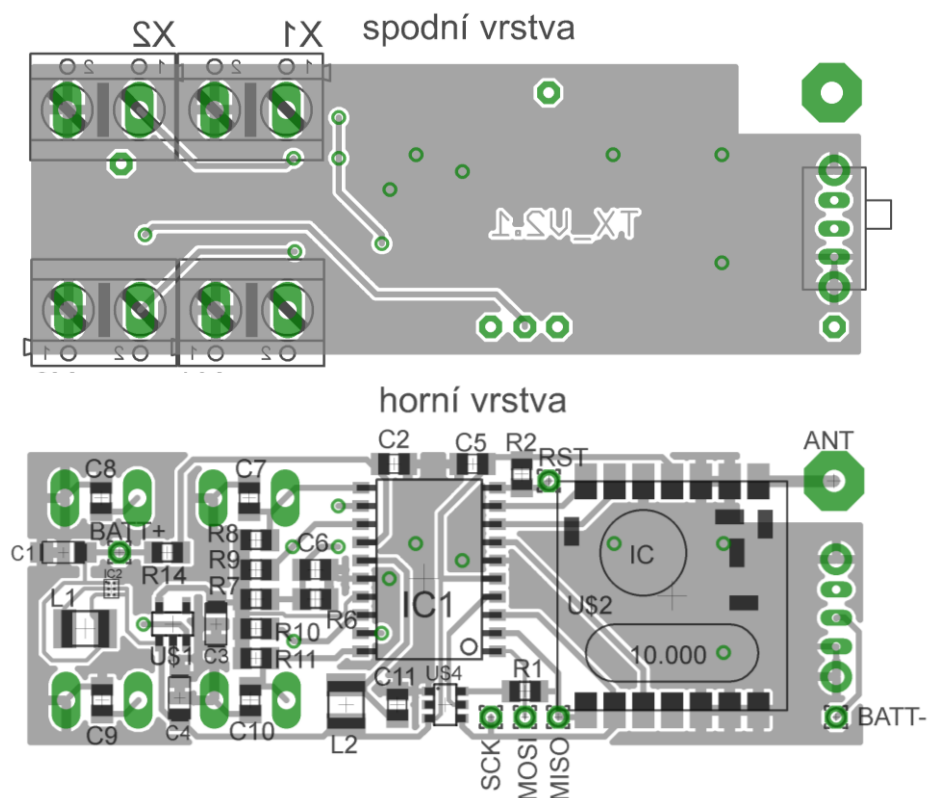
Obr. 5: schéma zapojení vysílacího modulu

Mikrokontroler Attiny26L je spojen s bezdrátovým modulem RFM02 prostřednictvím SPI sběrnice, která je softwarově emulovaná. Na tuto sběrnici je připojeno i digitální teplotní čidlo TMP123, které má separovaný selektivní signál. Mikrokontroler dále ovládá regulátor LP2980 a snímá napětí na baterii pomocí signálu BATTSTATUS. Jelikož vysílač nevyžaduje přesné časování kontroleru, je použit zabudovaný oscilátor (nastaven na kmitočet 4MHz). Tím se ušetřilo místo a hlavně dva piny kontroleru, které byly použity pro komunikaci. Napájení AD převodníku je filtrováno (součástkami L2, C11) a pod celým kontrolerem je vylitá měděná vrstva. Z důvodu úspory místa nemá každý obvod svůj vlastní blokovací kondenzátor. Proto byl brán zřetel na jejich nejlepší možné umístění.

Měřicí část obvodu je složena z precizního regulátoru LP-2980 a 5-ti odporových děličů. Jeden hlavní referenční dělič je tvořen odpory R7 a R6. Další 4 děliče jsou složeny vždy z jednoho odporu (R8-R10) a jednoho teplotního čidla PT100, které je připojeno na příslušnou svorkovnici (X1-X4). Každý vstup pro odporové čidlo je opatřen kondenzátorem, aby se odrušily VF složky. Kondenzátor také zajistí, že se během krátkého měřicího cyklu hodnota napětí nezmění. Všechny děliče mají společnou napájecí větev, která zároveň plní i funkci teplotního provázání odporů R7-R10. Teplotní provázanost je docílena silnějším měděným spojem a umístěním odporů blízko sebe. V ideálním případě by měly mít odpory R7-R10 úplně stejnou hodnotu odporu a minimální hodnotu koeficientu ppm (ppm- vyjadřuje změnu odporu vlivem teplotního působení).

Hodnoty napětí ze 4 měřicích děličů jsou vždy porovnávány s napětím referenčního děliče pomocí diferenciálního měření popsáno v kapitole 1.2.

Při navrhování DPS byl kladen důraz především na velikost modulu a na odolnost vůči rušení analogových obvodů. Plošný spoj je dvouvrstvý, přičemž spodní vrstva slouží výhradně pro propojovací vodiče a zemní plochy. Nejsou zde umístěny žádné SMD součástky, aby bylo možné k modulu přidat i miniaturní Li-pol článek a zároveň dodržet co nejnižší profil celého modulu. Druhá (svrchní) vrstva obsahuje veškeré obvody a vysílací modul. První verze byla opět vyrobena v domácích podmínkách fotocestou. Po několika úpravách byla vytvořena finální verze 2.1. Tento plošný spoj byl společně s Li-pol baterií zalit do elektrotechnické pryskyřice. S prvotní verzí se prováděly skoro až destruktivní testy viz kapitola 5.1.



Obr. 6: spodní a horní vrstva plošného spoje

## 1.5 RF moduly

Stručný přehled informací o bezdrátových modulech firmy HopeRF určených pro jednosměrnou komunikaci pomocí FSK modulace.



Obr. 7: modul RFM01 [17]

HopeRF RFM01 je nízko výkonový multikanálový FSK přijímač pracující ve frekvenčním pásmu 868MHz. Všechny důležité funkce jsou integrovány v jediném čipu.

- Napájení 2,2-5,4V
- Rozsah pracovních teplot - 40~85°C
- Nízká spotřeba 3mA a ve stand-by režimu pouhých 0,3μA
- Komunikace po 16 bitovém SPI
- Programovatelná šířka pásma
- (67 to 400 kHz)
- Nastavitelné zesílení
- Vysoká rychlost přenosu až 115kbps
- Automatická kontrola frekvence (AFC)
- Data quality detection (DQD)
- Status registr
- Interní filtrace dat + dataclock recovery
- 16 bitové FIFO
- Výstupy pro reset, nebo zdroj hodinového signálu pro mikrokontroler
- Kompaktní balení 16-pin TSSOP
- Velmi nízká cena cca 90kč



Obr. 8: modul RFM02 [17]

HopeRF RFM02 je jednočipový nízkovýkonový FSK vysílač pro bezlicenční pásmo 868MHz. Všechny důležité funkce jsou integrovány v jediném čipu. Vysílač obsahuje nastavitelný výkonový VF zesilovač.

- Napájení 2,2-5,4V
- Rozsah pracovních teplot - 40~85°C
- Nízká spotřeba 14-25mA během vysílání a ve stand-by režimu pouhých 0,3μA
- Stabilní a přesná FSK modulace s programovatelnou odchylkou
- Vysoká rychlost přenosu až 115kbps
- Nastavitelná šířka pásma
- Integrovaný VF nastavitelný zesilovač
- Obvod pro automatické ladění antény
- Komunikace po 16 bitovém SPI
- Wake-up časovač
- Datová synchronizace pomocí IRQ signálu
- Výstup hodinového signálu pro mikrokontroler
- Kompaktní balení 16-pin TSSOP
- Velmi nízká cena cca 90kč

Moduly byly vybrány především díky těmto parametrům: nízká spotřeba, poměr cena výkon a velikost. Navzdory velmi nízké ceně (kolem 90 Kč/modul) se moduly pyšní mnoha přednostmi. Především odpadá jakékoliv manuální nastavování analogových a dalších parametrů přenosu, vše je řízeno přes SPI sběrnici. Nespornou výhodou je možnost volby způsobu přenosu dat (pomocí speciálního módu sběrnice SPI, nebo pomocí oddělené sériové linky řízené vysílacím modulem). Pro základní funkci modulů není zapotřebí žádných externích součástek, snad kromě keramického blokovacího kondenzátoru.

Moduly nabízí velmi zajímavou možnost poskytování volitelného hodinového signálu (1-10MHz) pro externí komponenty (procesory, převodníky, atd.). Tímto můžeme ušetřit místo na plošném spoji a náklady při vývoji či výrobě zařízení. Nicméně této možnosti nebylo využito a to hned z několika důvodů.

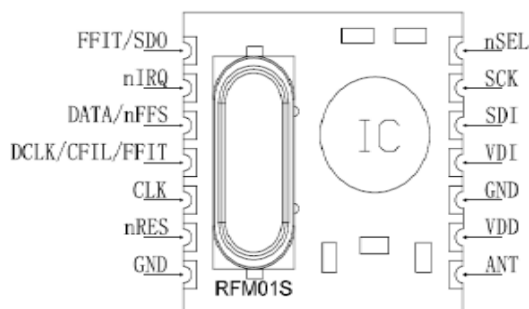
- U vysílače a přijímače není zapotřebí přesného časování hodin mikrokontroleru, protože časování zpráv si řídí samotné moduly pomocí IRQ nebo DCLK signálu.
- Ve vysílači byla nouze o volné piny mikrokontroleru, díky internímu oscilátoru bylo možné použít další dva volné piny.
- Snadnější cesta vývoje. Snaha vyhnout se neočekávaným problémům, které v praxi nastávají skoro za každý okolností. Proto byly zvoleny interní oscilátory, které jsou softwarově nastavitelné (1; 4 a 8Mhz).

Jedinou nevýhodou interních oscilátorů je velká závislost na okolní teplotě a napájecím napětí, nicméně v této aplikaci to nevadí.

Při výběru modulů se zdálo, že ovládnout bezdrátovou komunikaci bude snadné, realita však byla úplně jiná. Katalogové listy k modulům místy uvádějí mylné údaje nebo dokonce některé údaje neobsahují vůbec. Například informace o časových prodlevách, které je nutné dodržet pro správnou funkci interních obvodů, se výrazně liší od reality. Některé použité registry nejsou vůbec popsány, nebo se katalog od katalogu částečně liší. Dalším neduhem je nečitelnost některých obrázků, které zobrazují vzorovou komunikaci ve speciálních režimech SPI.

Bylo nutné zkoušet různá nastavení a hardwarové kombinace, což bylo velmi časově náročné. Velkou pomocí byla práce se čtyř-kanálovým osciloskopem, na kterém byla komunikace odladěna.

### 1.5.1 Komunikace s přijímacím RF modulem:



popis použitých pinů:

SDO- SPI datový výstup

DATA- datový výstup komunikace

DCLK- hodinový takt komunikace

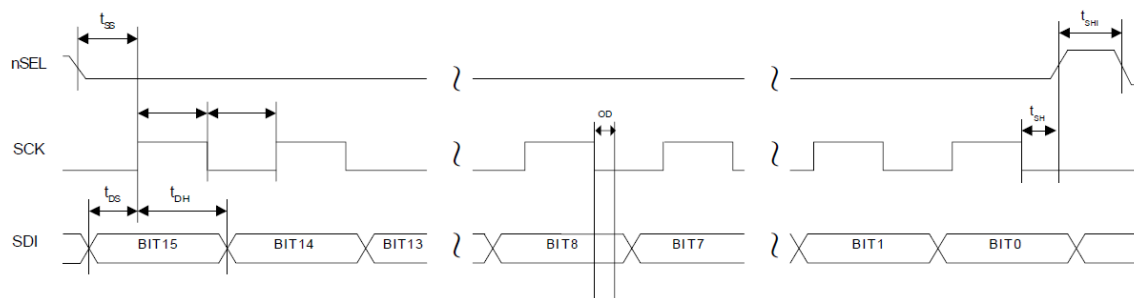
nSEL- SPI selektor

SCK- SPI hodinový takt

SDI- SPI datový vstup

Obr. 9: popis přijímacího čipu [11]

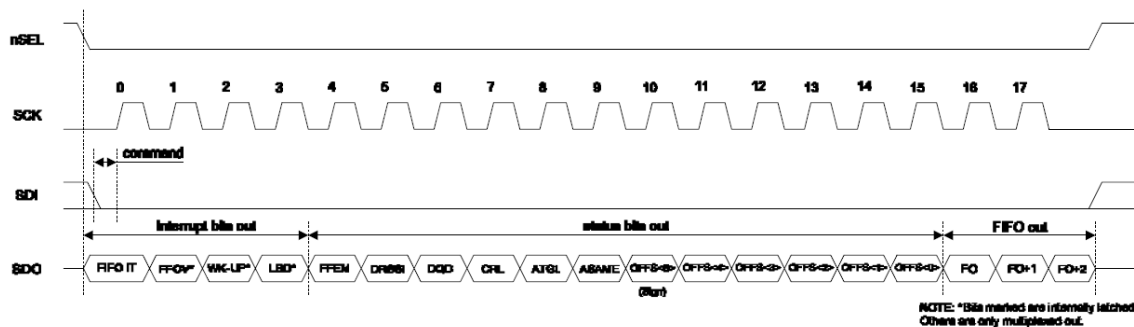
Komunikace SPI využívá signálů nSEL pro selekci zařízení (aktivní log.0), SDI je nastavován podle datového příkazu, SCK signál potvrzuje stav signálu SDI na každé vzestupné hraně.



Obr. 10: časové schéma pro vyslání příkazu po sběrnici SPI [11]

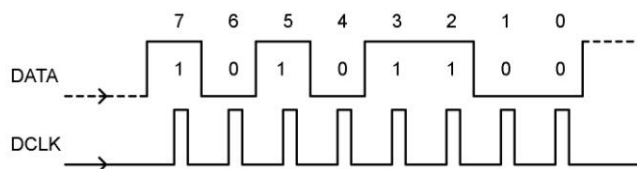
Pro příjem status registru, je třeba vyslat příkaz obsahující pouze nuly viz. SDI linka na časovém schématu Obr.11. SDO signál je následně nastavován přijímacím modulem a čten na každé vzestupné hraně signálu SCK. Signál SCK je generován mikrokontrolerem.

Status registr obsahuje informace o stavu interních periférií a hlavně o offsetu vysokofrekvenční nosné vlny. Hodnota offsetu je reprezentována 5ti bity, plus jeden znaménkový bit. Výpočet provádí interní obvod a vyjadřuje odchylku nosné frekvence přijaté vlny od frekvence která je nastavena v přijímači. Tato hodnota pak koriguje nastavení registru Frequency Setting Command viz. kapitola 3.1.



Obr. 11: časové schéma pro příjem status registru po sběrnici SPI [11]

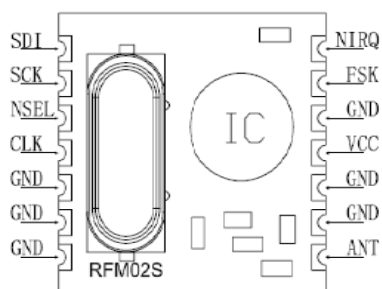
Přijem datových zpráv je realizován pomocí sériové linky, která používá dva signály DATA a DCLK. DATA signál je nastaven modulem a na každé vzestupné hraně signálu DCLK je stav zaznamenán. Jako příklad poslouží příjem jednoho bytu viz. časový diagram (Obr.12).



**Obr. 12: časový diagram příjmu jednoho bytu**

Přijímací modul obsahuje obvod pro detekci rychlosti datového toku, proto je nutné odesílanou zprávu začít několika bajty o binární hodnotě 10101010, aby se obvod synchronizoval. Tím dojde ke správné rekonstrukci signálu DCLK. Ovšem nastává zde jeden problém v době, kdy je vysílač vypnut nebo je mimo dosah. Více v kapitole 3.1.

#### 1.5.2 Komunikace s vysílacím RF modulem:



popis použitých pinů:  
SDI- SPI datový vstup  
SCK- SPI hodinový takt  
nSEL- SPI selektor  
FSK- datový vstup  
nIRQ- přerušení

**Obr. 13: popis vysílacího čipu [12]**

Komunikace s RF vysílačem je stejná jako u RF přijímače, jediný rozdíl je, že vysílač nemá SDO výstup.

Vysílání zprávy může probíhat dvěma způsoby: buďto speciálním módem SPI sběrnice, nebo pomocí datového vstupu FSK. Pro moduly byla zvolena druhá možnost.

Průběh vysílání je řízen signálem přerušení nIRQ. Po zapnutí interních obvodů vysílače začne signál nIRQ vysílat pulsy s určitou frekvencí, která je dána nastavením datového toku. Na každé sestupné hraně signálu nIRQ dojde k nastavení signálu FSK, dle jednotlivých bitů odchozí zprávy.

## 1.6 Procesor Atmega8A (modul přijímače)

Je nízko příkonový 8bitový CMOS mikrokontroler založený na AVR RISC architektuře. Nabízí 8kb FLASH paměti, 512byťů paměti EEPROM, 1kb SRAM a 130 instrukcí.

Přehled základních vlastností [15]:

- Napájecí napětí 2,7 až 5,5V
- Teplotní rozsah -40 až 85°C
- 32x8 univerzálních pracovních registrů
- Takt jádra procesoru až 16Mhz
- 23 nastavitelných digitálních vstupů/výstupů
- ISP-In-System Programming (jednoduché programování přímo v aplikaci)
- Spousta periférií (3xČasovač/Čítač, RTC, 3xPWM, 8xADC, TwoWire sériové rozhraní, UART, SPI, Analogový komparátor, Watchdog)
- Speciální funkce (Ochrana před podpětím, Interní oscilátor, zdroje přerušení, pět různých úsporných módů)

Tento mikrokontroler byl vybrán kvůli vysokému počtu digitálních vstupů/výstupů, periférii UART a možnosti použití interního oscilátoru. Zajímavá je také cena, která se v maloobchodech pohybuje od 35 do 50 Kč.

Další velmi podstatnou výhodou je programovací rozhraní ISP, které umožňuje programovat kontroler přímo v hotové aplikaci, tím pádem lze snadněji odladit prototyp, nebo dodatečně provádět změny. Také odpadá nutnost pořizovat drahý programátor, protože si vystačíme jen s počítačovým LPT portem a TTL driverem (impedanční oddělovač). Takto lze za cca 30 Kč postavit funkční AVR-ISP programátor.

Každý mikrokontroler ATmega8A má od výroby nastaven zdroj hodinového signálu z interního oscilátoru, který pracuje na frekvenci 1Mhz při 5V. Pro tuto aplikaci však bylo nutné zvýšit takt na 4Mhz. To se provádí pomocí programovatelných pojistek (FUSE). Při nastavování je nutné dbát opatrnosti, protože špatné nastavení může mikrokontroler zničit, nebo jej uvést do zcela jiného režimu získávání hodinového taktu. Poté se dá situace napravit jedině zásahem do hardware.

Pojistky byly nastaveny dle záložky v datasheetu „Calibrated Internal RC Oscillator“ CKSEL3:0= 0011. Další nastavení kontroleru a jeho periférii se provádí přímo v běhu programu, který je nahrán do paměti FLASH. Podrobnosti k nastavení registrů jsou v kapitole 3.1.

Prvotní nastavení použitých periférií se provádí pomocí CodeWizzardAVR. Tato část programu umožňuje vybrat typ procesoru a staticky nastavit vlastnosti jeho periférii. Některá nastavení se však musí provést během programu, zde už musíme použít katalogový list. Nastavení registrů je popsáno pomocí komentářů přímo v programu, viz. příloha strany 1-5.

Mikrokontroler plní funkci popsanou v kapitole 1.3.

## 1.7 Procesor ATtiny26L (modul vysílače)

Nízko příkonový 8bitový CMOS mikrokontroler založený na vylepšené AVR RISC architektuře. ATtiny26L nabízí 2kb FLASH paměti, 128b EEPROM a 128b SRAM. K dispozici je 118 instrukcí, většina z nich je proveditelná v jednom jediném hodinovém cyklu.

Přehled základních vlastností [16]:

- Napájecí napětí 2,7 až 5,5V
- Teplotní rozsah -40 až 85°C
- 32x8 univerzálních pracovních registrů
- Takt jádra procesoru až 8Mhz
- 16 nastavitelných digitálních vstupů/výstupů
- ISP-In-System Programming (jednoduché programování přímo v aplikaci)
- Spousta periférií (2xČasovač/Čítač, 2xPWM, 11xADC single ended 7xdiferenciální vstup se zesílením, SPI, Analogový komparátor, Watchdog)
- Speciální funkce (Ochrana před podpětím, Interní oscilátor, zdroje přerušení, pět různých úsporných módů)

Hledání mikrokontroleru vhodného pro vysílací modul bylo docela náročné. Počáteční požadavky byly: AD převodník s diferenciálním vstupem a zesílením, provoz na nízkém napětí, nízká spotřeba a velikost čipu.

Téměř všechny tyto požadavky splňoval právě čip ATtiny26L. Jediné co nevyšlo úplně podle představ byla velikost čipu. Nicméně, programovatelné diferenciální vstupy se zesílením, nahradily operační zesilovače (+pasivní součástky), či jiné obvody pro měření rozvážení mostu. Tímto se ušetřilo mnohonásobně více místa. Více v kapitole 1.2.

Pro zajištění správné funkce<sup>1</sup> je nutné zvýšit takt procesoru na 4Mhz, což se bohužel projeví vyšší spotřebou. Postup nastavování zdroje hodinového signálu pro jádro ATtiny26L je totožný s nastavováním jako u ATmega8A.

Nastavení periférii se provádí pomocí CodeWizzardAVR. Některá nastavení se však musí provést během programu, zde už musíme použít katalogový list. Nastavení registrů je popsáno pomocí komentářů v programu viz. příloha strany 6-10.

Mikrokontroler je během provozu pravidelně přiváděn<sup>2</sup> do režimu nízké spotřeby, konkrétně „power down mode“. V tomto stavu nekmitá interní oscilátor a všechny periférie jsou vypnuty. Registry jsou nastavené tak, aby „probuzení“ proběhlo na základě nastavení pinu IRQ do log.0. Poté naskočí interní oscilátor a program se vrátí na místo, kde skončil.

---

<sup>1</sup> Při taktu 1Mhz docházelo k nespolehlivému odečtu logického stavu pinu IRQ, protože signál IRQ má tvar obdélníkového signálu s velmi krátkou délkou trvání log.1(5%).

<sup>2</sup> Před přechodem je nutno nastavit způsob, jakým proběhne „probuzení“ kontroleru, v opačném případě se kontroler úplně odmlčí. Z tohoto stavu se lze dostat pomocí resetu, nebo vypnutí a zapnutí.

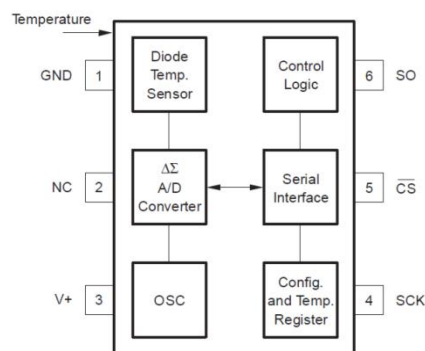


## 1.8 Teplotní čidlo TMP123

Je digitální teplotní čidlo od společnosti Texas Instruments. Čidlo bylo vybráno díky jednoduché implementaci do systému a díky nízké spotřebě energie. Další výhodou je široká škála napájecího napětí a velký rozsah měřených teplot. Slouží ke sledování teploty celého modulu, tím pádem i ke kompenzaci odchylek.

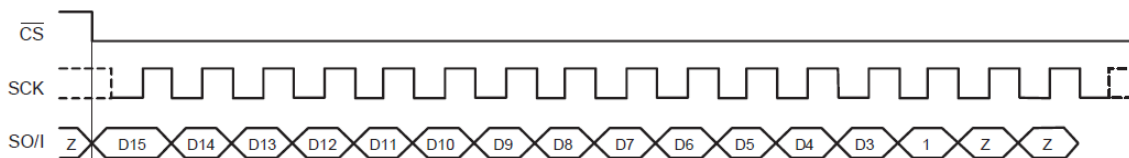
Základní parametry:

- Napájecí napětí 2,7 až 5,5V
- Klidový proud  $1\mu\text{A}$
- Teplotní rozsah  $-40$  až  $125^{\circ}\text{C}$ , v mezích  $-25$  až  $85^{\circ}\text{C}$  přesnost  $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$
- Rozlišení 12-bit  $0,0625^{\circ}\text{C}$ , 1 bit slouží jako znaménko  $\pm \text{xxx}^{\circ}\text{C}$
- Komunikace po sběrnici SPI
- Tiny SOT-23-6 pouzdro



Obr. 14: schéma čidla TMP123 [9]

Teplotní čidlo komunikuje s procesorem pomocí sběrnice SPI, která je softwarově emulovaná. Komunikační sekvence je zobrazena na Obr. 14.



Obr. 15: časové schéma SPI komunikace s čidlem TMP123 [9]

Řídící logika TMP123 má pouze jeden 16-ti bitový registr, který je vyslán na základě požadavku signálu CS (log.0), poté je na každé vzestupné hraně signálu SCK přečten logický stav signálu SO.

Popis registru:

- D15 je znaménkový bit 0 značí teploty nad  $0^{\circ}\text{C}$ , 1 značí teploty pod  $0^{\circ}\text{C}$ .
- D14-D3 jsou bity reprezentující hodnotu teploty.
- Hodnota registru 0100 1011 0000 0000 odpovídá teplotě  $150^{\circ}\text{C}$
- Hodnota registru 0000 0000 0000 0000 odpovídá teplotě  $0^{\circ}\text{C}$

Před čtením teploty je nutné nechat provést proces konverze teploty, který trvá typicky 250ms, spotřeba obvodu během konverze je  $50\mu\text{A}$ .

Konverze je zahájena po nastavení signálu CS na log.1. V případě, že je signál CS v log.1 nastaven déle, probíhá opakované měření teploty každých 500ms. Pokud chceme číst teplotu ve chvíli, kdy probíhá konverze, tak se děj přeručí a obvod vyšle hodnotu předešlé kompletní konverze. Pokud je signál CS nastaven na log.0, přejde obvod do stavu, kdy se spotřeba sníží na  $0,1\mu\text{A}$

## 2 Power management vysílače

Vysílací modul je primárně určen pro provoz na miniaturních nabíjecích či primárních bateriích. Proto je vyžadována velmi nízká průměrná spotřeba, aby bylo možné moduly provozovat i dlouhodobě. Další možností napájení modulu jsou generátory, které získávají energii z prostředí (energy harvesting).

Pro přehled jsou uvedeny hodnoty proudů, které prochází součástkami<sup>1</sup> (za různých stavů), dále je uvedena doba trvání těchto stavů. Z údajů můžeme vypočítat kolik energie modul spotřebuje během jedno pracovního cyklu.

### 2.1 Napájení vysílače

Na začátku vývoje (skládání obvodů na nepájivém poli) bylo zvoleno napájecí napětí 5V. Toto napětí se dle návrhu mělo dodržet i ve finální aplikaci. Proto byl zvolen stejnosměrný step-up měnič TPS61240, výrobce Texas Instruments.

Výhody měniče:

- Účinnost 90%
- Výstupní napětí 5V při 450mA max
- Vstupní napájecí napětí 2,6-4,5V
- Pouze pár pasivních součástek nezbytných pro funkci
- Miniaturní rozměry, pouhých 1,3x0,96mm

Během vývoje se prováděl test, kde byl step-up měnič přemostěn a napájecí větev VCC byla napájena přímo z regulovatelného zdroje. Cílem bylo zjistit, zda je modul schopen provozu na napětí 3,4-4,1V. Tento rozsah představuje provozní napětí Li-pol článku.

Předpokládalo se, že výsledek AD převodu se bude zásadně měnit, neboť se změnou VCC se mění i napájení analogové části mikrokontroleru. Překvapivě byly výsledky AD převodu stejné pro spodní i horní hranici napájení. Díky nízkému úbytkovému regulátoru LP-2980 zůstává pevné referenční napětí 3V i na spodní hranici napájení. Obvody RFM02 a TMP123 nejsou závislé na změně napájecího napětí.

Nižší napětí VCC vede k energetickým úsporám. Ušetří se také energie, kterou by spotřebovával měnič.

Tyto závěry vedly k jednoznačnému rozhodnutí. Měnič byl přemostěn a celá napájecí větev VCC byla napojena přímo na kladnou svorku baterie.

---

<sup>1</sup> pro výpočet a měření proudů byly čidla PT100 nahrazeny pevným odpory hodnoty 100Ω.

## 2.2 Parametry spotřeby dle katalogových listů

Modul je nastaven tak, že teplotu změří a vyšle každých 11 sekund. V případě požadavku na prodloužení (či zkrácení) měřicího cyklu by bylo nutné modul přeprogramovat.

napájecí napětí 5V					
	stav	proud [mA]	příkon [mW]	doba trvání [s]	spotřeba energie [mW]
Attin26L	aktivní	2,5	12,5	1	12,5
	sleep	0,001	0,005	9,92	0,050
LP-2980	zapnut	7,5	37,5	0,4	15
	vypnut	0,001	0,005	10,52	0,053
RFM02	vysílání	24	120	0,036	4,32
	nevysílá	3	15	0,964	14,46
	sleep	0,003	0,015	9,92	0,149
TMP123	aktivní	0,05	0,25	0,8	0,2
	neaktivní	0,001	0,005	10,1	0,051
celkem				<b>10,92</b>	<b>46,78</b>

**Tabulka 2: přehled energetické náročnosti jednotlivých stavů pro napětí 5V**

Podle katalogových údajů je průměrná spotřeba modulu  $4,28\text{mWs}^{-1}$ . Průměrná hodnota proudu odebíraného ze zdroje je tedy  $0,856\text{mA}$ .

Z tabulky vyplývá, že energeticky nejnáročnější stavy jsou:

- Mikrokontroler v aktivním režimu
- Regulátor napájející čidla PT100 je zapnut
- RF modul zapnut v pohotovostním stavu

Nejvyšší příkon má však vysílací modul během přenosu zprávy. Vysílání je však natolik krátké, že se na průměrné spotřebě podepíše méně, než provoz mikrokontroleru či měření čidly PT100.

## 2.3 Experimentální měření proudu procházejícího součástkami

Měření se provádělo na hotovém modulu. Vzhledem ke krátkému trvání některých stavů, byl software mikrokontroleru upraven, aby bylo možné určit ustálenou hodnotu proudu. Napájecí napětí bylo zvoleno 3,7V.

napájecí napětí 3,7V					
	stav	proud [mA]	příkon[mW]	doba trvání [s]	spotřeba energie[mW]
Attin26L	aktivní	3	11,1	1	11,10
	sleep	0,001	0,0037	9,92	0,037
LP-2980	zapnut	7,8	28,86	0,4	11,54
	vypnut	0,001	0,0037	10,52	0,039
RFM02	vysílání	24,4	90,28	0,036	3,25
	nevysílá	3	11,1	0,964	10,70
	sleep	0,01	0,037	9,92	0,37
TMP123	aktivní	0,05	0,185	0,8	0,15
	neaktivní	0,001	0,0037	10,1	0,037
celkem				<b>10,92</b>	<b>37,22</b>

**Tabulka 3: přehled energetické náročnosti jednotlivých stavů pro napětí 3,7V**

Podle reálných měření je průměrná spotřeba modulu  $3,41\text{mWs}^{-1}$ . Průměrná hodnota proudu odebíraného ze zdroje je tedy 0,921mA.

Výsledky se od katalogový údajů liší, avšak adekvátně k rozdílu napětí ke kterým se výpočty vztahují (5V; 3,7V).

## 2.4 Baterie Li-pol

K napájení je určena miniaturní nabíjecí Li-pol baterie o napětí 3,7V a kapacitě 200 mAh. Článek je dodáván s elektronikou chránící proti přebíjení či úplnému vybití.

Baterie je prakticky nejvíce omezujícím článkem, co se provozní teploty týče. Běžné baterie pro spotřební elektroniku jsou designované na provozní teploty v rozsahu -20 až 60°C. Při těchto teplotách je výrobcem garantována funkčnost. V extrémech však baterie trpí ztrátou kapacity, rychleji se vybíjí, zvyšuje se vnitřní odpor a snižuje se počet nabíjecích cyklů (běžné baterie je možné 300-500x nabít a vybit). Při vyšších teplotách dochází k mírnému úbytku napětí.

Vzhledem ke kapacitě baterie a průměrné hodnotě odebíraného proudu lze stanovit zaručenou dobu provozu modulu na 9 dní. Poté už může docházet ke škodlivému vybíjení článku.

V případě, že by se měření provádělo každých 5 min byla by průměrná spotřeba modulu  $0,135\text{mWs}^{-1}$ . Průměrná hodnota proudu odebíraného z baterie je tedy 0,0367mA. V takovém případě by modul fungoval po dobu cca 227dní.

### 3 Popis software prostředí

Nedílnou částí této práce je software. Byl psán ve dvou programovacích jazycích. Nejzákladnějším je kód jazyka C, který je nahrán do mikrokontrolerů obou modulů. Pro programování a nahrávání kódu sloužil program CodevisionAVR společnosti HPinfotech. Software určený jako grafické rozhraní pro PC (platforma Windows) byl vytvořen v programu Delphi 7 společnosti Borland. Pro správné fungování modulu připojeného do USB je nutno nainstalovat ovladače[13] k FTDI převodníku, nebo použít kompletní instalační balíček programu WirelessThermometerV2.0.exe, kde se ovladače nacházejí. Balíček je nahrán na příloženém CD.

Při psaní kódu jazyka C posloužila učebnice Delphi[3], nápověda programu CodevisionAVR a především webové stránky Sallyx.org[5], na kterých je přehledně zpracován základ jazyka C.

#### 3.1 Kód v jazyku C pro přijímač

Nezbytným zdrojem informací pro tvorbu kódu byl katalogový list k mikrokontroleru ATmega8A[15] a kniha o programování mikrokontrolerů ATmega16[1]. V obsluze těchto kontrolerů není žádný podstatný rozdíl. V této kapitole je uvedena hlavní část programu, která je trochu zkrácená. Celý kód i s definicí funkcí a proměnných se nachází v příloze strany 1-5.

##### ZAČÁTEK ZKRÁCENÉHO KÓDU:

```
void main(void)
{
    unsigned int temp=0;

    UCSRA=0x00; // USART initialization
    UCSRB=0xD8;
    UCSRC=0x86;
    UBRRH=0x00;
    UBRL=0x19; // USART initialization end

    ACSR=0x80; // Analog Comparator: Off
    SREG=0x80; // Global interrupts enable

    rf_init(); //RF initialization procedure

    write_cmd(0b1100000010110001); //receiver setting command last bit enables rx ,clock
    recovery
    while (1) //main loop
    {
        if (DATA==0) // DATA low detection procedure
        {
            vdicount++;
            if (vdicount==2500)
            {
                vdicount=0;
                rcvflag=1;
                write_cmd(0b1100011000001111); //AFC Command strobe start
                while (DATA==0);
            }
        }
        else
        {
            vdicount=0;
            rcvflag=0;
        } // DATA low detection procedure end
    }
}
```

KÓD POKRAČUJE NA NÁSLEDUJÍCÍ STRANĚ

## POKRAČOVÁNÍ KÓDU

```
if (rcvflag==1) // DATA analyse procedure
{
    packetindex=0;
    count=0;
    // clock recovery packet recognition
    while (DATA==1);
    while (DATA==0);
    while (DATA==1);
    while (DATA==0);
    while (DATA==1);
    while (DATA==0);
    while (DATA==1);
    while (DATA==0);
    while (DATA==1);
    while (DATA==0);
    while (DATA==1);
    while (DATA==0);
    while (DATA==1);
    while (DATA==0);

    while (DCLK); //delay for start data reading

    bitindex=0;
    packetindex=0;

    while (bitindex<140)
    {
        while (DCLK==0); //read DATA bit on rising edge

        temp = temp << 1;
        temp = temp | DATA ;

        count++;
        bitindex++;

        if (count==8) //make one byte for data packet
        {
            count=0;
            packet[packetindex]=temp;
            packetindex++;
        } //make one byte for data packet end
        while (DCLK==1);
    }

    write_cmd(0b1100011000001111); //AFC Command controled by strobe
    packet[16]=0xff;
    temp=readstatus(); //read status register,get carrier offset value
    packet[17]=temp&0b00011111; //offset value
    temp=temp>>5;
    packet[18]=temp&0b00000001; //offset sign 1 means minus
    //DATA analyse procedure end
}

if (rcvflag==1) //send DATA packet over USART procedure
{
    packetindex=1;
    UDR=packet[0]; //start sending packet over USART, driven by interrupt
    rcvflag=0;
}

if (offsetflag==1) //trimm RF carrier frequency procedure
{
    temp=0b1010000100000000+offset; // offset setup, only on recieved value of offset
    write_cmd(temp); //initial carrier freq setup is 861,25
    offsetflag=0;
} //trimm RF carrier frequency procedure end
}
```

## KONEC KÓDU

V první části programu se provede inicializace periférii a RF modulu, poté se spustí příjem zpráv pomocí *write\_cmd*. Následuje hlavní smyčka programu *main loop*, která se neustále opakuje.

Při zprovoznění komunikace jsem se potýkal s jedním hlavním problémem. Pokud je přijímač zapnutý a vysílač vypnutý, objeví se na pinu DATA náhodné logické stavy vzniklé okolním rušením. Proto je nutné detekovat stav zapnutého vysílače. To se provádí procedurou *DATA low detection procedure*, kdy je signál DATA vysílačem nastaven na log.0 po dobu 35ms. Pokud je podmínka splněna, inkrementuje se proměnná *vdicounter*. Pokud tato proměnná dosáhne určité hodnoty, nastaví příznak *rcvflag*, který slouží k rozhodování o spuštění procedury *DATA analyse procedure*.

Na základě stavu příznaku *rcvflag* se v následujícím kroku spustí analýza přichozího signálu. Vysílač zahajuje přenos daty (0xAAAC), což je ve skutečnosti obdélníkový signál se střídou 1:1. Na základě těchto dvou bytů je přesně definovaný bod, kdy se započne čtení platných dat z pinu DATA. Po přečtení každých 8-mi bitů se vytvoří jeden byte který je uložen do pole proměnných *packet[packetindex]*. Pole *packet* se doplní o hodnotu offsetu<sup>1</sup> nosné vlny rádiového přenosu. Poté se obsah paketu odešle přes UART periférii. Přenos začíná zapsáním *packet[0]* do registru *UDR*, pak už je přenos řízen procedurou *int\_txc* (viz příloha), která je vyvolána na základě přerušení od UART periferie.

Poslední částí hlavní smyčky je *trim RF carrier frequency procedure*, která umožňuje doladit rádiovou frekvenci přijímače. Tato procedura je vyvolána pouze pokud je nastaven příznak *offsetflag*. Příznak se nastaví po obdržení nové hodnoty offsetu. Tuto hodnotu lze nastavit v uživatelském software, kolonka frequency offset kapitola 3.3 Obr.16.

Po přijetí platných dat je seskládán paket o délce 18 bytů, který je následně odeslán<sup>2</sup> do uživatelského PC. Struktura paketu je popsána tabulkou 4.

byte index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
význam	úvod		kanál 1		kanál 2		kanál 3		kanál 4		baterie		TMP123		součet		offset	
	UB	UB	HB	SB	HB	SB	HB	SB	HB	SB	HB	SB	HB	SB	HB	SB	HO	ZO
hodnota <sup>3</sup>	170	170	3	255	3	255	3	255	3	255	2	131	15	23	33	180	0	0

**Tabulka 4: struktura datového paketu**

vysvětlivky:

UB- úvodní byte

HB-horní byte

SB-spodní byte

HO-hodnota offsetu

ZO-znaménko offsetu

součet= kanál(1,2,3,4)+baterie+TMP123

<sup>1</sup> Hodnota offsetu se získává pomocí procedury *read\_status*. Offset je ukládán do interního status registru přijímače na základě obsluhy AFC strobe start příkazu.

<sup>2</sup> Přenos probíhá po virtuální sériové lince (zajišťuje obvod FT232BL).

<sup>3</sup> Dekadická reprezentace byte. (170 dekadických odpovídá hodnotě AA hexadecimální)

## 3.2 Kód v jazku C pro vysílač

I v tomto případě byl zdrojem informací především katalogový list mikrokontroleru ATtiny26L[16]. Pro inspiraci posloužila i kniha o programování mikrokontrolerů ATmega16[1]. Mezi těmito kontrolery už jsou podstatné rozdíly, nicméně nastavování některých periférií a vnitřních obvodů je totožné. Tato kapitola uvádí hlavní část programu, která je pro přehled zkrácená. Celý kód i s definicí funkcí a proměnných se nachází v příloze strany 6-10.

### ZAČÁTEK ZKRÁCENÉHO KÓDU:

```
void main(void)
{
    // ADC initialization
    ACSR=0x80;
    ADMUX=0x40;
    ADCSR=0x86;

    init(); //port direction and states initialization
    rf_init(); //RF module initialization

    while (1) //main loop
    {
        REGON=1; // turn on regulator for PT100

        delay_ms(200); // delay for stabilisation of

        packet[0]=read_adc(0b01010111); //X1 mux 10111 ref AREFpin
        packet[1]=read_adc(0b01010100); //X2 mux 10100 ref AREFpin
        packet[2]=read_adc(0b01001110); //X3 mux 01110 ref AREFpin
        packet[3]=read_adc(0b01001011); //X4 mux 01011 ref AREFpin
        packet[4]=read_adc(0b01000011); //BATSTATUS mux 00011 ref AREFpin

        ADMUX=0b01010111; //set ADMUX, better consumption in this mode
        REGON=0; //turn off regulator for PT100

        packet[5]=digitemp(); //read temp from digital sensor over SPI

        packet[6]=0;

        for (i=0;i<6;i++) // checksum calculation, result in packet[6]
        {
            packet[6]=packet[6]+packet[i];
        }

        write_cmd(0b1100000000111000); //enable transmission
        write_fsk_word(0b110011001100); //preparing clock recovery circuit of receiver
        write_fsk_word(0b110011001100);
        write_fsk_word(0b101010101010);
        write_fsk_word(0b101010101010);
        delay_ms(35); // DATA pin of receiver set low
        write_fsk_word(0xAAAC); //clock recovery and sync word
        write_fsk_word(0xAAAA);
        write_fsk_word(packet[0]); //start of packet transmission
        write_fsk_word(packet[1]);
        write_fsk_word(packet[2]);
        write_fsk_word(packet[3]);
        write_fsk_word(packet[4]);
        write_fsk_word(packet[5]);
        write_fsk_word(packet[6]); //check sum packet transmission
        write_fsk_byte(0x00);
    }
}
```

KÓD POKRAČUJE NA NÁSLEDUJÍCÍ STRANĚ



## POKRAČOVÁNÍ KÓDU

```
//setting up sleep configuration of transmitter
write_cmd(0b1100000000111000); //clearing wake up enable bit
write_cmd(0b1110011010011011); //wake up timer cmd r=6 64 m=155 => period 9920ms
write_cmd(0b1100000000000010); //power command wakeuptimer enable bit
write_cmd(0b1100010000000001); //sleep command execute
//setting sleep mode for microcontroller
GIMSK=0b01000000; //enable INT0 for wakeup
SREG=0b10000000; //enable global interrupt
MCUCR=0b00110000; //set SEbit ,INT0, power down mode
#asm("sleep"); //execute sleep
//after sleep returns to this row
GIMSK=0; //disable INT0 interrupt
SREG=0; //disable global interrupt
MCUCR=0b00010000; //clear SEbit ,INT0 on low level, power down mode
}
```

## KONEC KÓDU

Na začátku programu se nastavují základní parametry AD převodníku a následně jsou inicializovány porty pomocí procedury *init()*. Dále proběhne inicializace RF modulu pomocí procedury *rf\_init()*.

Hlavní smyčka programu začíná spuštěním regulátoru, který napájí čidla PT100. Aby nedocházelo k nepřesnostem měření, čeká program 200ms na ustálení napětí. Napětí se musí ustálit na všech blokovacích kondenzátorech měřícího obvodu. Poté se spustí první AD převod. Každý kanál je měřen 4 krát, výsledkem je průměrná hodnota z těchto čtyř měření.

Při prvních pokusech byly výsledky relativně nepřesné. Potíž byla v rychlém přepínání mezi kanály. Proto je po každém přepnutí zařazena pauza, která byla experimentálně stanovena na hodnotu 30ms<sup>1</sup>. Díky pauze se ustálí hodnoty napětí ve vnitřních obvodech mikrokontroleru ATtiny26L. Jako poslední se provádí měření napětí na baterii. Zde se přepíná AD převodník do single-ended módu a zaznamenává se hodnota napětí na svorkách baterie. Zajímavostí bylo zjištění, že vypnutý AD převodník má větší spotřebu energie, pokud bylo jeho poslední nastavení v módu single-ended. Proto je AD převodník, po měření stavu baterie, opět přepnut na diferenciální způsob měření<sup>2</sup>.

Následující procedura *digitemp()* , provede čtení registru z teplotního čidla TMP123. Čtecí sekvence je popsána v kapitole 1.8.

Dalším krokem je zapnutí vysílače pomocí procedury *write\_cmd()*. Začne vysílání pomocného paketu (pomocí procedur zapisování dat *write\_fsk\_word*), který slouží jako předvoj vysílaných dat. Nasbíraná data se odešlou po pauze 35ms. Přehled vysílané zprávy je uveden v kapitole 3.1.

Následují obslužné rutiny pro uvedení obvodů do stavu minimální spotřeby. Nastavení jsou provedena na základě informací z katalogových listů. Návrat do aktivního režimu zajišťuje wake-up obvod RF modulu.

---

<sup>1</sup> Při zkoušení a odhadování délky pauzy byly nastaveny největší možné rozdíly napětí (mezi měřenými kanály), tak aby se simulovali nejnepříznivější podmínky.

<sup>2</sup> Po přepnutí se neprovádí žádné měření.

### 3.3 Aplikace pro PC

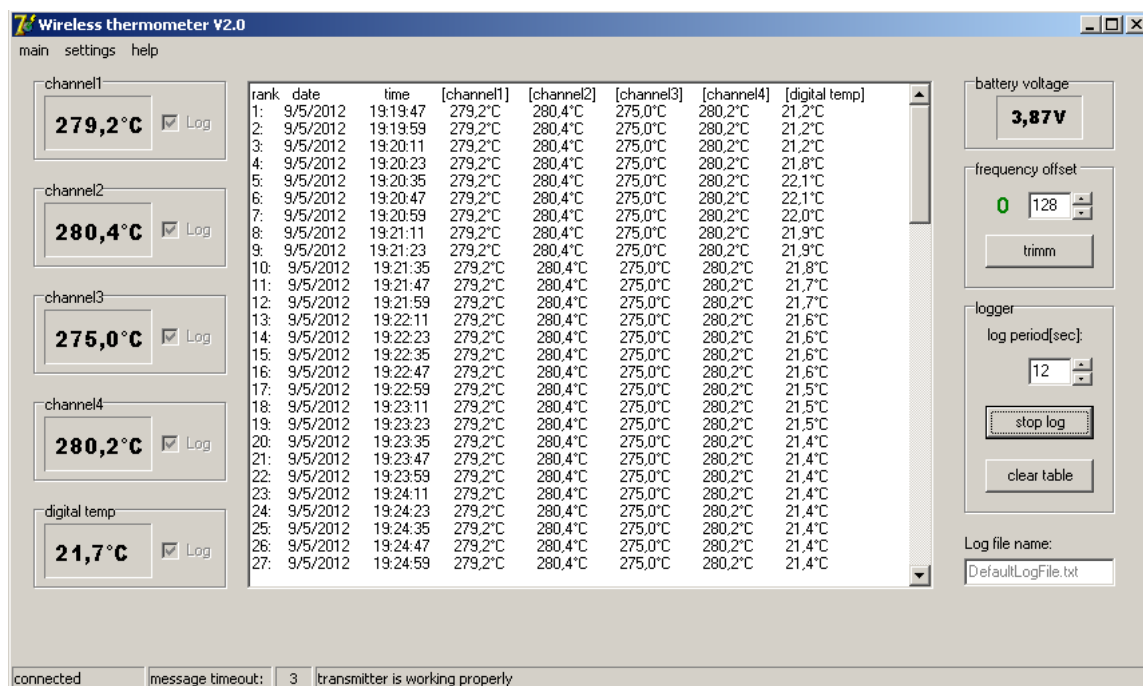
Aplikace byla vytvořena v objektově orientovaném programu Delphi 7. Který je určen pro tvorbu aplikací pracujících na platformě Windows. Při programování bylo čerpáno z literatury Delphi začínáme programovat[3] a z programátorského fóra builder.cz[6].

Úkolem hlavního okna je zobrazovat stav systému a průběh měření. K monitorování stavu bezdrátové komunikace složí spodní lišta (status bar). Na které je uveden aktuální stav připojení přijímače k PC, dále je zde vyobrazen čas uplynulý od posledního přijetí platných dat. Na liště se také nachází informace o stavu vysílače.

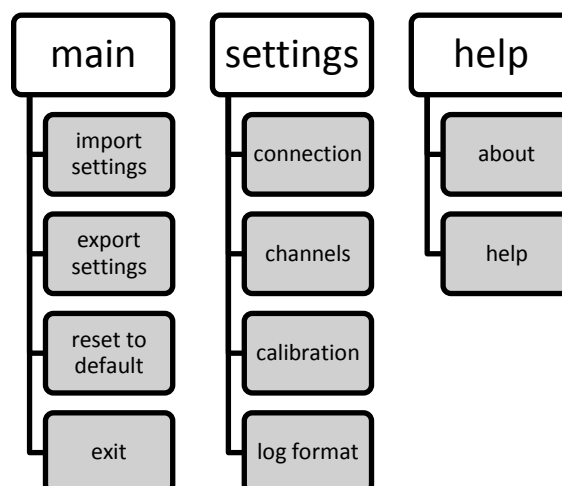
V pravém horním rohu je zobrazeno napětí na baterii, které by se mělo pohybovat v rozmezí 3,5 až 4,1V.

Na horní liště se nachází menu, jehož struktura je popsána na Obr.17. V hlavním okně lze nastavit, které kanály a v jakém intervalu se budou zaznamenávat. Před začátkem záznamu je možné zvolit libovolný textový soubor, do kterého se budou výsledky ukládat. V případě, že už soubor se stejným názvem existuje, budou nové záznamy přidány ke stávajícím.

V případě extrémních podmínek může nastat malý rozdíl mezi nosnou frekvencí přijímače a vysílače. Například, jeden z modulů je tepelně namáhán, nebo na něj působí nečekané vlivy okolí (např.: extrémní vlhkost). Pak může dojít k mírné změně hodnoty offsetu nosné frekvence. Za normálních okolností hodnota kolísá v rozmezí  $\pm 3$  (hodnotu 128 není třeba měnit). V případě, že vysledujeme rostoucí (klesající) trend, je vhodné hodnotu 128 upravit.



Obr. 16: hlavní okno uživatelského software



Obr. 17: struktura menu umístěného na horní liště programu

Nabídka *main* umožňuje exportovat či importovat hlavní nastavení programu, do kterého patří především jména a hodnoty offsetu jednotlivých kanálů. Dále umožňuje vrátit program do úplně původního stavu těsně po instalaci

Záložka *settings* nabízí:

- connection- volba sériového portu
- channels- nastavení jména kanálu a jeho zobrazování v hlavním okně
- calibration- uživatelská kalibrace čidel pomocí offset hodnoty
- log format- úprava formátu, ve kterém se bude provádět záznam

V poslední záložce *help* se nachází základní informace o hardware a software celého systému. Kliknutím na tlačítko *help* se otevře návod jak s programem a moduly pracovat.

Při každém otevření (zavření) programu se načte (uloží) veškeré nastavení. K tomuto účelu slouží soubor „settings.txt“. V případě nahrání konfiguračního souboru pomocí tlačítka import settings se importované hodnoty okamžitě zapíší do souboru „settings.txt“.

Nároky programu na hardware jsou minimální, jediným požadavkem je volný USB port verze 1.1;2.0.

## 4 Kalibrace a kompenzace

Vysílací modul je nutné nejprve zkalibrovat, aby se sbírané hodnoty co nejvíce blížili hodnotám skutečným. Kalibrace se dělí na dvě etapy. První kalibrační proces se provádí pomocí dvou známých teplotních stavů vody. Tento proces se provádí po sestavení modulu (uživatel do něj nezasahuje). Druhý kalibrační proces provádí uživatel pomocí změn v software určeného pro PC.

### 4.1 Kalibrační procesy

Vysílací modul je během kalibrace udržován ve stále pokojové teplotě. Po sestavení modulu se připojí čidla PT100.

#### 4.1.1 První kalibrační proces (výrobní)

První kalibrační proces je náročnější, než druhý. Koncový uživatel nemá možnost tento proces provést či jej ovlivnit.

Čidla se ponoří<sup>1</sup> do tepelně izolované lázně s vodou, ve které se rozpouští ledová tříšť<sup>2</sup>. V takovéto lázni je teplota 0°C. Poté co se teplota čidel ustálí, odečteme výsledky AD převodu. Pro každý kanál definujeme hodnotu AD převodu v bodě 0°C. Kanál č.1. měl hodnotu 82[-].

Druhou fází je zjišťování výsledku AD převodu pro lázeň, která je přivedena do bodu varu, tedy 100°C. Po ustálení teplot čidel odečteme výsledek AD převodu. Pro každý kanál definujeme hodnotu převodu při 100°C. Kanál č.1. měl hodnotu 419[-].

Jelikož je charakteristika čidel PT100 lineární, postačí nám (pro celý rozsah měření) jednoduchá převodní rovnice (4).

$$teplota = \frac{T_{100^{\circ}\text{C}} - T_{0^{\circ}\text{C}}}{AD_{100^{\circ}\text{C}} - AD_{0^{\circ}\text{C}}} \cdot (AD_{\text{aktuální}} - AD_{0^{\circ}\text{C}}) [^{\circ}\text{C}] \quad (4)$$

Například pro pokojovou teplotu 20°C platí, že  $AD_{\text{aktuální}}$  má hodnotu 149.

$$teplota = \frac{100 - 0}{419 - 82} \cdot (149 - 82) \approx 19,9^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

---

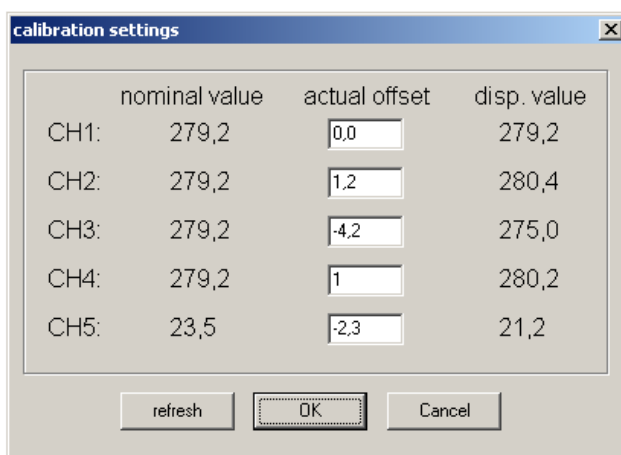
<sup>1</sup> Čidla by se musí ponořit do vody i s cca 5-10cm dlouhým kusem vedení, aby se zamezilo vlivu okolní teploty na kalibrační proces.

<sup>2</sup> Lázeň musí být stále míchána, aby se zajistilo, že teplota bude v celém jejím objemu stejná.

#### 4.1.2 Druhý kalibrační proces (uživatelský)

V tomto procesu lze kalibrovat i čidla PT100, se kterými se neprováděl první kalibrační proces. Je však doporučeno používat čidla, které mají identickou charakteristiku jako čidla kalibrovaná v prvním procesu.

Vlastní kalibrace v uživatelském software se provádí pomocí nastavování offsetové hodnoty (Obr. 17 actual offset), která je přičtena či odečtena od získaného výsledku (Obr.17 nominal value). Pro zjištění hodnoty offsetu postačí pouze jeden jediný přesně definovaný bod. Např.: do vroucí vody vložíme nekalibrované čidlo, které po ustálení ukazuje teplotu 98,3°C, poté nastavíme offset na hodnotu 1,7°C.



	nominal value	actual offset	disp. value
CH1:	279,2	0,0	279,2
CH2:	279,2	1,2	280,4
CH3:	279,2	-4,2	275,0
CH4:	279,2	1	280,2
CH5:	23,5	-2,3	21,2

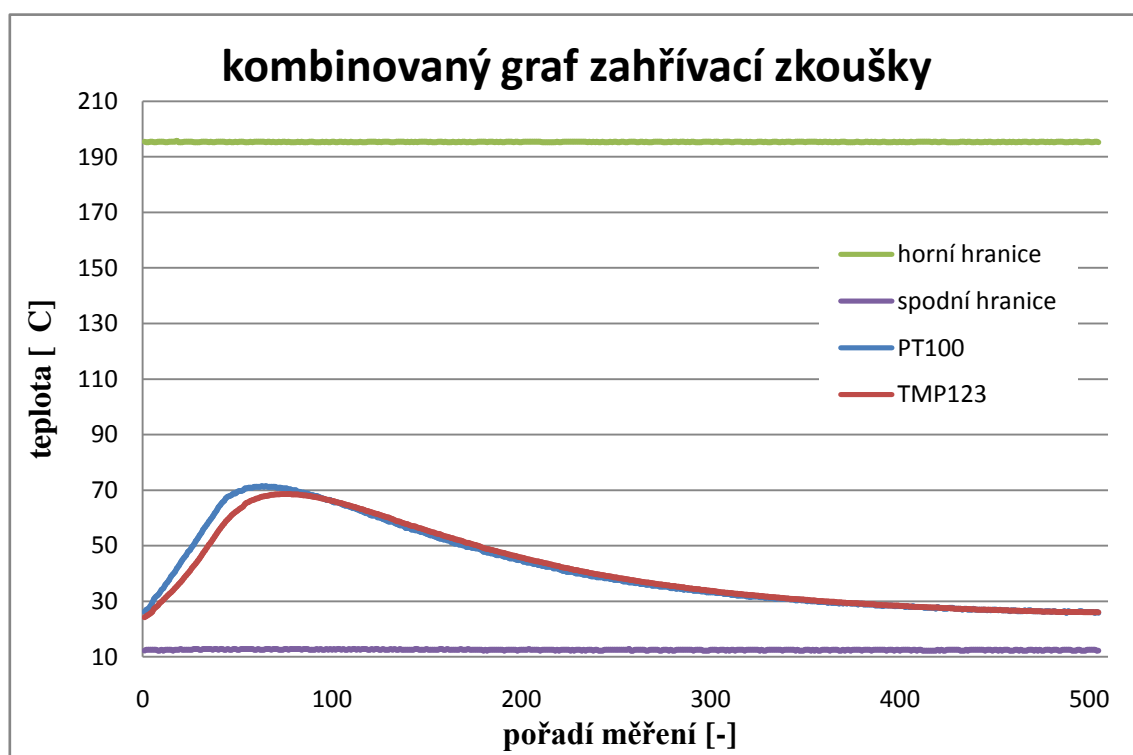
Obr. 18: dialog pro uživatelskou kalibraci

Dále je možné kalibrovat digitální čidlo. Zjištění offsetu se provádí následujícím způsobem. Za pokojové teploty přiložíme kalibrované čidlo PT100 na povrch modulu a vhodně tepelně spojíme. Poté modul tepelně izolujeme a čekáme na ustálení teplot. Pokud se údaj z digitálního čidla liší (od údaje naměřeného pomocí PT100), upravíme jej pomocí hodnoty offsetu.

## 4.2 Kompenzace vlivu okolní teploty

Jelikož bude modul umístěn v prostorách rotoru, očekává se zvýšená provozní teplota, která nepříznivě ovlivňuje výsledek měření čidly PT100. Vyšší teplota nemá nepříznivý vliv na digitální čidlo TMP123. Proto čidlo slouží ke kompenzaci odchylek, vzniklých ohřevem modulu. Odchylka vzniká především díky zahřívání měřících rezistorů.

Kompenzace se provádí na základě experimentálního měření, kdy jsou ke dvěma kanálům připojeny pevné odpory<sup>1</sup>. Na jeden kanál je připojeno čidlo PT100, které je tepelně spojené s modulem. Zahřejeme modul na teplotu cca 70°C. Poté se nechá pozvolna chladnout v izolovaném prostředí. Zkoumáme závislost odchylky měřených odporů na teplotě uvnitř modulu (graf 2)<sup>2</sup>.



Graf 2: záznam z provedené teplotní zkoušky

Z grafu je zřetelné, že se výsledek teplotního měření, za zvýšených teplot, se výrazně nemění. Odchylka<sup>3</sup> je natolik malá, že není důvod provádět kompenzaci<sup>4</sup>.

V případě, že bychom chtěli modul provozovat za vyšších teplot, bylo by nutné, z bezpečnostních důvodů, odebrat akumulátor a provést měření znova.

<sup>1</sup> Odpory nahrazují tepelné čidlo (s konstantní teplotou). Odpory jsou umístěny mimo zahřívací komoru v teplotně stabilním poli.

<sup>2</sup> Jedno měření má délku cca 12 sekund.

<sup>3</sup> Pro horní a spodní hranici rozsahu vzniklá odchylka 1bit, cca 0,3°C.

<sup>4</sup> Platí pro pracovní rozsah do 70°C.

## 5 Testování

Z důvodu nedostupnost zatím nebylo testování na elektrickém stroji provedeno. Byly aspoň provedeny dílčí zkoušky (mechanické a tepelné).

### 5.1 Teplotní testy

Teplotní testy se prováděli v plynové celoplechové troubě MORA. Testovací teploty běžně dosahovaly 70°C. Až na jeden případ, kdy z důvodu chabé regulace a nepozornosti došlo k překročení teploty 110°C. I přes takto vysokou teplotu modul odesílal data. Avšak výsledky z pevných odporů dosahovaly odchylky až 2°C. Naštěstí nedošlo k poškození modulu nebo k výbuchu baterie.

#### 5.1.1 Zapojení při testech

K modulu jsou připojeny 2 pevné odpory a jedno teplotní čidlo PT100. Odpory<sup>1</sup> o hodnotě 105 a 176Ω jsou umístěné mimo troubu. Čidlo PT100 je umístěno nejbližší čidlu TMP123. Odpory slouží k určení chyby vzniklé zahříváním modulu. Data získané z tohoto měření se používají jako podklad pro teplotní kompenzaci.

### 5.2 Mechanické testy

Modul byl ukotven na hřídeli čtyřpólového asynchronního motoru, který se otáčel rychlostí 1500ot.min<sup>-1</sup>. Test probíhal 30minut, za přímé viditelnosti vysílač-přijímač. Během této doby nedošlo k jedinému selhání komunikace. Hodnoty naměřené na pevných odporech byly po celou dobu neměnné.

### 5.3 Test radiového přenosu

Při teplotních testech byl vysílač umístěn v celoplechové uzavřené troubě a přijímač byl umístěn ve vedlejší místnosti. Na vzdušné spojnici vysílač-přijímač se nachází dvojité plech a cihlová stěna. Přes tyto překážky signál prošel. Během 30minutové zkoušky komunikace selhala 2 krát. Chybovost je tedy 1,3%.

Dalším testem bylo vysílání přes několik pater obytného domu. Komunikace byla spolehlivá při vysílání přes 4 patra. V pátém patře už nastaly problémy s příjmem zpráv.

---

<sup>1</sup> Odpory jsou voleny tak, aby výsledné hodnoty byly blízko hranic rozsahu, který nás nejvíce zajímá.

## 6 Závěr:

Výsledkem snažení se stal hotový systém schopný spolehlivého provozu. Zařízení je velmi kompaktní a do budoucna rozšiřitelné např.: další kanály, či tenzometrické měření. Výsledky poskytnuté měřícím systémem jsou velmi přesné (vzhledem k zamýšlenému použití).

Na první pohled se může zdát, že sestavit pár součástek a vhodně je propojit je relativně jednoduché. Avšak dojít k výsledku stálo mnoho úsilí a času. V podstatě se vyvíjely tři hlavní části systému, hardware, software mikrokontrolerů a vyšší uživatelský software pro PC. Všechny tyto části spolu velmi úzce souvisí, proto změna vyvolaná v jedné z částí může zásadně ovlivnit části další. Velkým přínosem při vývoji se ukázalo pečlivé verzování software a souborů sloužících jako podklady pro výrobu DPS. Při vývoji jsem si dělal pečlivé poznámky, což vedlo ke zpřehlednění. Další výhodou byla možnost vrátit se k předchozím myšlenkám.

Díky vhodnému časovému rozvržení a využití mechatronických přístupů k řešení problematiky se vývoj zařízení relativně zkrátil. Další neopomenutelnou výhodou byly mé předchozí znalosti a zkušenosti z elektrotechniky, programování mikrokontrolerů a programování v Delphi.. Právě díky těmto zkušenostem nedocházelo k bloudění ve slepých uličkách a čas se efektivně využil k vývoji. Bez těchto zkušeností by se pravděpodobně vývoj protáhl na mnohem delší období.

Při navrhování a upravování zvoleného řešení jsem konzultoval možnosti s odborníky, kteří se v oblasti elektrických strojů pohybují. Tyto konzultace byli velmi přínosné, jelikož mi byly sděleny zkušenosti o již proběhlých měřeních.



## 7 Zdroje

- [1] Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR - ATmega16, Matoušek David, Vydavatelství BEN, ISBN/EAN 80-7300-174-8/9788073001742, 320 stran B5 + CD
- [2] Učebnice jazyka C 1.díl, Herout Pavel, Vydavatelství Kopp, ISBN/EAN 978-80-7232-383-8/9788072323838, 270 stran A5
- [3] Delphi začínáme programovat, Pošta Jan, Vydavatelství BEN, ISBN/EAN 80-7300-034-2/9788073000349, 176 stran A5 + disketa
- [4] Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž - SMT a SMD, Šandera Josef, Vydavatelství BEN- technická literatura, ISBN/EAN 80-7300-181-0/9788073001810, 272 stran B5
- [5] Petr Bílek, Sallyx [online], rev.2011-04-22, dostupné z: <http://www.sallyx.org/sally/c/>
- [6] Builder, veřejné programátorské fórum [online], dostupné z: <http://www.builder.cz/>
- [7] PT100 datasheet [PDF], [Rev.A0], Cyntec Co., [cit 3.2.2012], dostupné z: [http://www.cyntec.com/product/pt\\_sensor/download/SA10100609.pdf](http://www.cyntec.com/product/pt_sensor/download/SA10100609.pdf)
- [8] LP2980-N datasheet [PDF], [Rev.L], National Instruments, [cit 7.4.2012], dostupné z: <http://www.ti.com/lit/gpn/lp2980-n>
- [9] TMP123 datasheet [PDF], [Rev.C], Texas Instruments, [cit 3.4.2012], dostupné z: <http://www.ti.com/lit/gpn/tmp123>
- [10] TPS61240 datasheet [PDF], [Rev.B], Texas Instruments, [cit 4.2.2012], dostupné z: <http://www.ti.com/lit/gpn/tps61240>
- [11] RFM01 datasheet [PDF], HOPE RF electronic, [cit 19.1.2012], dostupné z: <http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM01.pdf>
- [12] RFM02 datasheet [PDF], HOPE RF electronic, [cit 19.1.2012], dostupné z: <http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM02.pdf>
- [13] D2XX driver (FTDI ovladače) [ver. 2.08.24], FTDI chip, dostupné z: <http://www.ftdichip.com/Drivers/D2XX.htm>
- [14] FT232BL datasheet [PDF], [V2.2], FTDI chip, [cit 21.1.2012], dostupné z: <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT232B.html>
- [15] ATmega8A datasheet [PDF], [8159D-AVR-02/11], Atmel microprocessor products, [cit 21.1.2012], dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc8159.pdf>

- [16] ATtiny26L datasheet [PDF], [1477K–AVR–08/10], Atmel microprocessor products, [cit 18.1.2012], dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc1477.pdf>
- [17] Fotky RF modulů [JPG], TME e-shop products, [27.1.2012], dostupné z: [http://www.tme.eu/cz/katalog/?idp=1&search=rfm01&cleanParameters=1#id\\_category=113194&page=2%2C20](http://www.tme.eu/cz/katalog/?idp=1&search=rfm01&cleanParameters=1#id_category=113194&page=2%2C20)

## **8 Seznam použitých zkratk + vysvětlivky**

FSK- Frequency Shift Keying, klíčování komunikace pomocí změny frekvence

VF- Vysoko Frekvenční

Li-pol- Lithium-Ion POLymer battery, typ lithiového článku

USB- Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice

UART- Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, univerzální asynchronní přijímač/vysílač

SPI- Serial Peripheral Interface, sériové periferní rozhraní

DPS-Deska Plošného Spoje

EMC- Electro Magnetic Compatibility , elektromagnetická kompatibilita

RF- Radio Frequency, rádiová frekvence

Hand-effect- efekt vzniklý dotykem antény a částí lidského těla

Offset- odchylka hodnoty od její požadované hodnoty

Byte- datová jednotka složená z 8-mi bitů, bit je základní binární záznam

Flash- typ datové paměti, který uchovává data i za vypnutého stavu, paměť je možné elektronicky smazat a znovu do ní zapsat

Single-ended- analogové měření napětí vůči potenciálu 0V.

## 9 Seznam použitých obrázků, tabulek a grafů

Obr. 1: modulární složení systému .....	2
Obr. 2: měřicí můstek .....	3
Tabulka 1: přehled stavů krajních mezí rozsahu .....	5
Graf 1: graf závislosti výstupní hodnoty AD převodníku na vstupním napětí [16] .....	5
Obr. 3: schéma zapojení přijímacího modulu .....	6
Obr. 4: plošný spoj přijímacího modulu .....	7
Obr. 5: schéma zapojení vysílacího modulu .....	8
Obr. 6: spodní a horní vrstva plošného spoje.....	9
Obr. 7: modul RFM01 [17].....	10
Obr. 8: modul RFM02 [17].....	10
Obr. 9: popis přijímacího čipu [11] .....	12
Obr. 10: časové schéma pro vyslání příkazu po sběrnici SPI [11] .....	12
Obr. 11: časové schéma pro příjem status registru po sběrnici SPI [11] .....	12
Obr. 12: časový diagram příjmu jednoho byte .....	13
Obr. 13: popis vysílacího čipu [12] .....	13
Obr. 14: schéma čidlaTMP123 [9] .....	16
Obr. 15: časové schéma SPI komunikace s čidlem TMP123 [9].....	16
Tabulka 2: přehled energetické náročnosti jednotlivých stavů pro napětí 5V.....	18
Tabulka 3: přehled energetické náročnosti jednotlivých stavů pro napětí 3,7V.....	19
Tabulka 4: struktura datového paketu.....	22
Obr. 16: hlavní okno uživatelského software .....	25
Obr. 17: struktura menu umístěného na horní liště programu .....	26
Obr. 18: dialog pro uživatelskou kalibraci.....	28
Graf 2: záznam z provedené teplotní zkoušky .....	29

## 10 Seznam příloh

1. Program přijímacího modulu.....	1
2. Program vysílacího modulu.....	6
3. Graf provedené teplotní zkoušky.....	11
4. Samostatný graf teplotní zkoušky .....	12
5. Přehled pouzder použitých integrovaných obvodů .....	13
6. Schéma zapojení přijímacího modulu .....	14
7. Plošný spoj přijímače .....	15
8. Schéma zapojení vysílacího modulu .....	16
9. Plošný spoj vysílače .....	17

Na přiloženém CD se nachází:

- elektronická verze bakalářské práce
- elektronická verze příloh
- programy v jazyku C
- program v jazyku Delphi
- ovladače obvodu FTDI
- kompletní uživatelský softwarový balíček
- katalogové listy součástek
- soubory s návrhem schémat a plošných spojů pro verzi Eagle 6.0.0 a vyšší
- prezentační list